

## مدل سازی خشک شدن لایه نازک انگور سفید بی دانه

یوسف عباسپور کلان<sup>۱</sup>، محمد علی نیکبخت<sup>۲</sup> و مجید رهنما<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

۳- نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان  
(rahnamam2002@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱/۳۰

### چکیده

خشک کردن انگور به عنوان یکی از محصولات استراتژیک کشاورزی در ایران با چالش‌های متعددی از جمله تغییر رنگ، فساد پذیری، آلودگی و زمان طولانی مواجه می‌باشد. با چنین رویکردی، پژوهش حاضر ضمن بررسی رفتار خشک شدن لایه نازک انگور سفید بی دانه ارومیه در خشک کن هوای - داغ، مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف منحنی فرآیند خشک شدن آن را معرفی می‌کند تا بتواند در طراحی خشک کن انگور مورد استفاده قرار گیرد. آزمایش تجربی خشک کردن در ۴ سطح دمای هوای خشک کننده، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱/۲ متر بر ثانیه انجام شد. داده‌های تجربی با ۱۰ مدل نیمه تئوری و تجربی بر اساس آماره‌های ضریب تعیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $X^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برازش شد. با توجه به نتایج، دمای هوای خشک کننده روی سرعت خشک شدن انگور، اثر معنی‌داری داشت و با افزایش دما، از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس زمان خشک شدن انگور حدود ۵۹ درصد کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد که فرآیند خشک کردن در مرحله با نرخ نزولی انجام پذیرفت. با مقایسه مدل‌های مورد ارزیابی جهت تعیین بهترین برازش منحنی فرآیند خشک شدن لایه نازک انگور، مدل میدلی و همکاران با ( $R^2=0/997859$ )، ( $X^2=0/0001679$ ) و ( $RMSE=0/010234$ ) بهترین برازش را داشت. تأثیر دمای هوای خشک کننده روی ضرایب و ثابت‌های این مدل نیز بررسی شد.

کلید واژه‌ها: سینتیک خشک شدن، مدل ریاضی، انگور سفید بی دانه، خشک کن هوای - داغ، نرخ خشک شدن

### مقدمه

فائو در سال ۲۰۰۹ بعد از کشورهای ایتالیا، چین، ایالات متحده آمریکا، فرانسه، اسپانیا، ترکیه و شیلی در مقام هشتم جهان قرار داشت (بی‌نام، ۱۳۸۹) که متأسفانه در سال ۲۰۱۰ میلادی به رتبه دهم جهان نزول کرد (بی‌نام، ۲۰۱۱). تاریخچه تولید کشمش از انگور به وسیله خشک کردن زیر نور آفتاب به سال ۱۴۹۰ میلادی در کشور

انگور<sup>۱</sup> با تولید سالانه ۶۵۴۸۶ میلیون تن یکی از محصولات با تولید سالانه بالا در دنیا می‌باشد (جراج و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹). ایران از لحاظ تولید انگور با سطح زیر کشت ۳۰۲ هزار هکتار با احتساب درختان پراکنده انگور و تولید ۱/۷ میلیون تن در سال ۱۳۸۷ مطابق آمار سازمان

1- *Vitis vinifera*

2- *Jairaj et al.*

در جلو آفتاب اشاره کرد. از سوی دیگر برخی از محصولات غذایی را نمی توان به روش سنتی و در زیر نور طبیعی خشک کرد زیرا برخی از خصوصیات متنوع خود را از دست می دهند و در مواردی خشک کردن نامناسب باعث فساد و خرابی محصول می شود. بنابراین لازم است که انگور به روشی مدرن و تحت شرایط کنترل شده خشک شود تا کیفیت محصول نهایی بهبود یافته و سود بیشتری در نتیجه فروش عاید تولید کننده گردد. برای طراحی و ساخت دستگاه لازم است مطالعه ای روی سینتیک خشک کردن آن انجام گیرد. محققان زیادی سینتیک خشک کردن محصولات کشاورزی را برای یافتن بهترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک کردن بررسی کردند که از آن جمله می توان به خشک کردن قطعات سیب زمینی (آکپینار و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۰۳)، لوبیا سبز (دویماز، ۲۰۰۵) و انجیر (بابالیز و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۰۶)، اشاره کرد.

متولی و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۰) به منظور ارزیابی روند خشک شدن لایه نازک دانه های انار داده های آزمایشگاهی را با ۱۰ مدل نیمه تئوری و تجربی برآزش دادند. آزمایش ها در در سه تیمار شاهد، پیش تیمار ماکروویو با توان ۱۰۰ و ۲۰۰ و شش سطح دمای ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس و سه سطح سرعت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه انجام شد و مدل میدلی بهترین برآزش را با داده های آزمایشگاهی نشان داد. آنها همچنین از شبکه های عصبی نیز برای تخمین میزان رطوبت دانه انار استفاده کردند.

زمردیان و مرادی<sup>۹</sup> (۲۰۱۰) مدل سازی ریاضی سینتیک خشک شدن لایه نازک زیره سبز را در یک خشک کن خورشیدی در دو حالت تابش (مختلط و غیرمستقیم) و شرایط مختلف خشک کردن بررسی کردند و در نهایت اعلام نمودند که مدل تقریب پخش برای

یونان برمی گردد (شارما و ادولز<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷). تولید جهانی کشمش در سال ۱۹۹۵ حدود ۱۰۷۲ هزار تن می باشد (پنگوان و همکاران<sup>۲</sup>، ۱۹۹۹).

افزایش مشکل غذا در اکثر کشورهای در حال توسعه به سبب عدم توانایی آنها در محافظت و ذخیره مازاد غذا مهم تر از تولید کم در این کشورهاست (جراج و همکاران، ۲۰۰۹). خشک کردن محصولات کشاورزی همواره یکی از قدیمی ترین و بهترین روشهای ذخیره مواد غذایی بوده است (یالدیز و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۱). خشک کردن به عنوان یک فرآیند حرارتی تحت شرایط کنترل شده برای کاهش رطوبت موجود در مواد غذایی به روش تبخیر تعریف می شود (فلوز<sup>۴</sup>، ۲۰۰۰) که باعث کاهش فعالیت آبی و در نتیجه کاهش رشد میکروارگانیسم ها و افزایش ماندگاری مواد غذایی می گردد. محافظت انگور با تبدیل آن به کشمش یک روش پر سود برای کشورهای تولید کننده انگور می باشد (دویماز و پالا<sup>۵</sup>، ۲۰۰۲) که انگور خشک شده (کشمش) همانند سایر محصولات کشاورزی خشک شده دارای ارزش اقتصادی بالایی می باشد.

انگور یکی از محصولات مهم و استراتژیک شهرستان ارومیه می باشد. سطح زیر کشت این محصول ۲۴۷۴۹/۷ هکتار و تولید سالیانه آن ۶۶۰۲۸/۶ تن می باشد (بی نام، ۱۳۸۹) و هر ساله حدود ۲۰ درصد محصول تولیدی به کشمش تبدیل می شود. کشاورزان تولید کننده انگور در ارومیه محصولات را به روش سنتی و در زیر نور آفتاب خشک می کنند و مزیتی که این روش دارد رایگان و در دسترس بودن انرژی خورشیدی است، اما این روش معایبی نیز دارد که از جمله این موارد می توان به نزول درجه و کاهش کیفیت محصول نهایی و در گاهی موارد حمله آفات حشرات، پرنده گان و دام به محصول پهن شده

1- Sharma and Adulze

2- Pangavhane *et al.*

3- Yaldiz *et al.*

4 - Fellows

5- Doymaz and Pala

6- Akpınar *et al.*

7- Babalis *et al.*

8- Motevali *et al.*

9- Zomorodian and Moradi

های فیزیکی و حرارتی آن نیاز است که می توان براساس آنها دستگاه خشک کن جدیدی با کارآیی مناسب طراحی کرد. هدف از این پژوهش بررسی سینتیک خشک شدن انگور سفید بی دانه رقم ارومیه در خشک کن لایه نازک آزمایشگاهی و ارائه بهترین مدل ریاضی خشک شدن لایه نازک انگور می باشد.

### مواد و روش ها

#### نحوه تهیه و آماده سازی نمونه ها

محصول انگور رقم سفید بی دانه ارومیه از باغات شهرستان ارومیه، استان آذربایجان غربی تهیه گردید. محصول در طول آزمایش درون یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. پیش از آزمایش خشک کردن دانه های انگور به صورت دستی از خوشه جدا شده و به مدت ۲ ساعت داخل پاکت پلاستیکی در محیط آزمایشگاه قرار داده شد تا با دمای محیط به تعادل برسد. پس از آماده شدن خشک کن و تنظیم آن در دماها و سرعت مورد نظر خشک کن به مدت نیم ساعت روشن شد تا به حالت مطلوب و پایدار برسد (اکپینار و همکاران ۲۰۰۳؛ متولی و همکاران، ۲۰۱۰؛ زمردیان و مرادی، ۲۰۱۰).

برای اندازه گیری محتوی رطوبت اولیه انگور، ۳ نمونه ۱۰۰ گرمی از محصول به روش آون خلاء در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد و فشار ۲۵۰ میلی بار به مدت ۶ ساعت خشک شدند (بی نام، ۱۹۹۰). رطوبت اولیه بر پایه خشک از رابطه (۱) محاسبه گردید:

$$M_{db} = \frac{W_o - W_d}{W_d} \quad (1)$$

که در آن،  $W_o$  و  $W_d$  به ترتیب جرم ماده خشک و جرم اولیه بر حسب گرم و  $M_{db}$  رطوبت نمونه بر پایه خشک می باشد (ایکچاکوو، ۱۹۹۹).

تابش مختلط و مدل میدلی برای تابش غیرمستقیم بهترین برازش را با داده های آزمایشگاهی نشان داده است.

یالدیز و همکاران (۲۰۰۱) مدل ریاضی خشک شدن لایه نازک انگور سلطانه (تامسون بی دانه) را در یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم فعال بررسی کردند. آنها برای تخمین منحنی خشک شدن لایه نازک انگور سلطانه در خشک کن خورشیدی ۸ مدل ریاضی خشک شدن لایه نازک را بر اساس ضرایب تبیین مقایسه کردند و در نهایت مدل دو المانه را با ضریب همستگی ۰/۹۷۹ به عنوان بهترین مدل برای برازش با داده های آزمایشگاهی معرفی کردند.

به طور کلی از سه نوع مدل جهت توصیف مشخصات خشک کردن به روش لایه نازک محصولات کشاورزی استفاده می شود: مدل تئوری، مدل نیمه تئوری و مدل تجربی. مدل تئوری خصوصیات خشک شدن و کاربرد پذیری آن را در شرایط کاری مختلف توصیف می کند، اما برخی فرضیات مربوط به شکل هندسی محصول، ضریب پخش رطوبت و رسانش منجر به بروز برخی خطاها در پیش بینی فرایند خشک شدن می شود (ککمک<sup>۱</sup> و یالدیز، ۲۰۱۱). مدل تجربی از اصول نظری خشک کردن صرف نظر می کند و یک تجزیه و تحلیل رگرسیونی بین میانگین میزان رطوبت دانه و زمان خشک شدن آن ارائه می کند. روش نیمه تئوری میانگینی از روش تجربی و تئوری است (یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱). اساس مدل های نیمه تئوری قانون دوم *Fick* می باشد و مدل ها بر روی نتایج آزمایش های صورت گرفته، گسترش می یابد (ککمک و یالدیز، ۲۰۱۱). مدل های هندرسون و پاییز<sup>۲</sup>، میدلی<sup>۳</sup>، پیچ<sup>۴</sup> و... که در جدول ۱ آورده شده از این روش استخراج شده اند. برای انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که بتوان براساس آن سینتیک خشک شدن انگور سفید بی دانه را به دست آورد به یک سری ویژگی -

- 1- Cakmak and Yaldiz
- 2- Henderson and Pabis
- 3- Midilli
- 4- Page

### روش خشک کردن با خشک کن آزمایشگاهی

انگور سفید بی دانه، روش خشک کردن لایه نازک انتخاب گردید. برای این منظور از یک خشک کن آزمایشگاهی لایه نازک استفاده شد. اجزاء اصلی خشک کن شامل یک دمنده گریز از مرکز برای تأمین جریان هوا، المنت های برقی (۷ المنت جمعا به قدرت ۷ KW) برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه خشک کن، سیستم کنترل (سرعت دمنده و دمای هوای خروجی) و محفظه خشک کن است. برای کنترل دمای عبوری از میکرو کنترلر (PT 100) با دقت  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ، برای توزین نمونه ها از ترازوی دیجیتال مدل PTY A200 ساخت شرکت Shinko ژاپن با دقت  $\pm 0.001\text{ gr}$  و حداکثر وزن قابل اندازه گیری ۲۰۰ gr و برای اندازه گیری سرعت جریان هوا از یک سرعت سنج دیجیتالی مدل GB-M-8355 ساخت شرکت Tsi ایالات متحده آمریکا با حساسیت  $\pm 0.1\text{ m/s}$  استفاده شد.

آزمایش در ۴ سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی ۱/۲ متر بر ثانیه انجام شد. پس از آماده شدن خشک کن و تنظیم آن در دماها و سرعت های مورد نظر، جبهه های انگور در سینی توری آلومینیومی مربعی به ضلع ۲۸ سانتی متر قرار داده شد. ضخامت دانه های انگور در هر آزمایش یک لایه و وزن هر نمونه ۱۰۰ گرم بود. با توجه به این که ثابت خشک شدن (K) در ابتدای آزمایش بزرگتر است و سپس به آهستگی کاهش می یابد (سیتکی<sup>۱</sup>، ۱۹۸۶). برای بررسی بهتر سینتیک خشک شدن در طی فرآیند خشک شدن کاهش وزن نمونه ها در فواصل ۳۰ دقیقه در ۳ ساعت اول، ۷ ساعت بعدی با فاصله ۱ ساعت و بعد از آن با فاصله ۲ ساعت انجام شد (متولی و همکاران، ۲۰۱۰).

مدل سازی ریاضی منحنی خشک شدن در بیشتر پژوهش ها، مدل سینتیک خشک کردن بر اساس شاخص رطوبت نسبی MR بیان می شود که علت آن کاهش

به منظور پیدا کردن مناسب ترین مدل خشک شدن پراکندگی و خوش فرم کردن داده ها است (اکپینار و همکاران، ۲۰۰۳). در طول آزمایش در جریان خشک کردن نمودار تغییرات رطوبت بر حسب زمان برای یک دمای ثابت هوای ورودی به محفظه خشک کن رسم می شود. منحنی که بدین ترتیب به دست می آید منحنی پیشروی خشک کردن نامیده می شود. در خشک کردن لایه نازک شکل منحنی را می توان با تقریب خوبی به وسیله مدل های ریاضی بیان نمود.

در مدل کردن خشک کردن به روش همرفتی فرض بر این است که نسبت حجم هوا به حجم محصول بی نهایت بزرگ است. بنابراین به جزء نوع و اندازه محصول، محتوای رطوبتی و دمای هوای خشک کننده اثر بقیه فاکتورهای موثر در نرخ خشک کردن ناچیز و قابل اغماض می باشد. با توجه به تئوری عمومی خشک کردن نرخ آب خارج شده از محصول با فاکتورهای همچون اختلاف فشارهای بخار بین هوای خشک کننده و سطح مرطوب، مساحت سطح محصول، ضریب انتقال جرم و سرعت هوای خشک کننده متناسب است (ایکچاوو، ۱۹۹۹؛ سیتکی، ۱۹۸۶).

$$\frac{dM}{dt} = \frac{P_v P_{va}}{(1/K_m A_s) R_o T_{abs}} = \frac{K_m A_s (P_v - P_{va})}{R_o T_{abs}} \quad (2)$$

در این رابطه،  $P_v$  فشار بخار در محصول ( $\text{N.m}^{-2}$ )،  $P_{va}$  فشار بخار هوای خشک کننده ( $\text{N.m}^{-2}$ )،  $A_s$  مساحت سطح محصول ( $\text{m}^2$ )،  $K_m$  ضریب انتقال جرم بخار آب ( $\text{kg.s}^{-1}\text{m}^{-2}$ )،  $R_o$  ثابت جهانی گازها ( $\text{J.k}^{-1}$ )،  $M$  محتوای رطوبتی محصول بر پایه خشک و  $T_{abs}$  دمای مطلق (K) می باشند. عبارت  $A_s(P_v - P_{va})$  در رابطه (۲)، نیروی مؤثر خارجی ناشی از شرایط محیطی را نشان می دهد در حالی که عبارت  $(1/K_m A_s)$  پارامتر مقاومتی محصول می باشد (ایکچاوو، ۱۹۹۹؛ سیتکی، ۱۹۸۶). فشار بخار جزئی را می توان به صورت رابطه (۳)

علامت منفی  $k$  نشان دهنده کاهش محتوای رطوبتی با زمان است که در ابتدای خشک کردن بزرگتر بوده و سپس به آهستگی کاهش پیدا می کند. هر قدر اثر کاهش  $k$  بیشتر باشد، طول مدت خشک شدن طولانی تر خواهد بود (سیتیکی، ۱۹۸۶).

اگر چه نسبت رطوبت به صورت رابطه (۵) تعریف می شود، برای خشک شدن طولانی مدت  $M_e$  نسبت به  $M_0$  و  $M_t$  بقدری کوچک است که می توان از آن صرف نظر کرد. بنابراین  $(M_t - M_e) / (M_0 - M_e)$  به  $(M_t/M_0)$  ساده می شود (متولی و همکاران، ۲۰۱۰؛ زمردیان و مرادی، ۲۰۱۰). نرخ خشک شدن انگور نیز از رابطه (۶) محاسبه شد (آکپینار و همکاران، ۲۰۰۳).

$$\text{Drying Rate} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (6)$$

نسبت های رطوبتی به دست آمده طی آزمایش های مختلف به منظور بررسی و انتخاب مناسب ترین مدل برای سینتیک خشک شدن محصول با ده مدل از بین مدل های استاندارد ارائه شده در مقالات معتبر دنیا (جدول ۱) برازش شدند.

بر حسب رطوبت نسبی بیان کرد (ایکچاوو، ۱۹۹۹).

$$\frac{dM}{dt} = -A P_S (\Psi_F - \Psi_K) \quad (3)$$

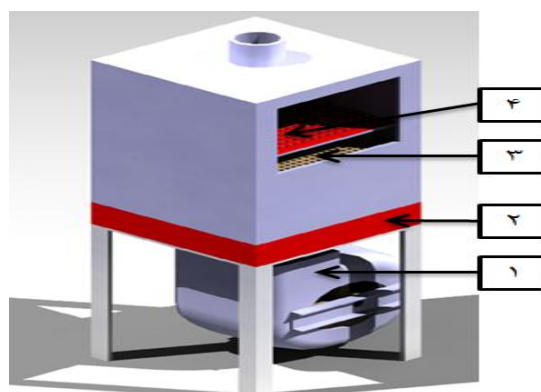
$P_S$  فشار بخار اشباع در دمای معین هوا بوده و  $\Psi_F$  رطوبت نسبی روی سطح جسم،  $\Psi_K$  رطوبت نسبی واسطه خشک کردن (هوا) و  $t$  زمان بر حسب ساعت ( $h$ ) می باشند. مطابق رابطه (۴)، تغییرات مقدار رطوبت در روی تک دمای جذب تقریباً خطی است و می توان نوشت (سیتیکی، ۱۹۸۶):

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_e) \quad (4)$$

با جدا کردن متغیرها و انتگرال گیری از زمان در محدوده  $0$  و  $t$  و محتوای رطوبتی ( $M$ ) در محدوده  $M_0$  (رطوبت اولیه محصول) و  $M_e$  (رطوبت تعادلی محصول) به معادله (۵) می رسیم (ایکچاوو، ۱۹۹۹):

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (5)$$

طرف چپ معادله نسبت رطوبت ( $MR$ ) را که مشخص کننده فرآیند خشک کردن است نشان می دهد.



شکل ۱- شماتیک خشک کن آزمایشگاهی: ۱- فن گریز از مرکز، ۲- هیتر، ۳- خطی ساز جریان، ۴- سینی نمونه ها

جدول ۱- مدل های ریاضی خشک شدن لایه نازک

شماره مدل	نام مدل	معادله مدل	منبع
۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	ماجومدار، ۱۹۸۷
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	آکینار و همکاران، ۲۰۰۳
۳	پیچ اصلاح شده	$MR = \exp(-kt)^n$	یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱
۴	هندرسون و پابلیس	$MR = a.\exp(-kt)$	هندرسون و پاییز، ۱۹۶۱
۵	لگاریتمی	$MR = a.\exp(-kt)+c$	یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱
۶	دوجمله ایی	$MR = a.\exp(-k_0t)+ b.\exp(-k_1t)$	آکینار و همکاران، ۲۰۰۳
۷	دوجمله ایی نمائی	$MR = a.\exp(-kt)+ \exp(-mt)$	آکینار و همکاران، ۲۰۰۳
۸	وانگ و سینگ	$MR = 1+ at+ bt^2$	یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱
۹	تقریب پخش	$MR = a\exp(kt) + (1-a)\exp(kbt)$	یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱
۱۰	میدلی و همکاران	$MR = a \exp(kt^n) + bt$	ساجچلیک و همکاران، ۲۰۰۶

شده توسط آلوارز و لکیس<sup>۱</sup> (۱۹۸۶) قابل مقایسه است. محصول تا رطوبت نهایی ۱۸٪ بر پایه تر خشک گردید (دویماز، ۲۰۰۷). محتوی رطوبتی انگور به طور پیوسته در طول دوره ی خشک شدن کاهش یافت. تغییرات جرم ناشی از کاهش رطوبت نمونه ها به محتوی رطوبتی بر پایه خشک تبدیل و ملاکی برای تعیین رطوبت آنی محصول در طول مدت زمان فرآیند خشک شدن بود و به محض این که وزن نمونه به وزن مربوط به رطوبت ۱۸٪ می رسید فرآیند خشک کردن متوقف می شد. رطوبت نسبی (MR) به صورت نسبت رطوبت نمونه ها در هر لحظه به رطوبت اولیه  $MR = M/M_0$  به دست آمد. نسبت های رطوبتی به دست آمده طی آزمایش های مختلف به منظور بررسی و انتخاب مناسب ترین نرخ خشک شدن محصول با ده مدل از بین مدل های استاندارد ارائه شده (جدول ۱) برآزش شدند که نتایج این برآزش در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به جدول ۲ و مقادیر  $R^2$ ،  $X^2$  و RMSE مدل میدلی و همکاران در تخمین تغییرات رطوبت طی خشک شدن انگور سفید بی دانه بهترین برآزش را داشت.

منحنی فرآیند خشک شدن براساس نسبت رطوبت در دمای مختلف برای داده های آزمایشگاهی و داده های حاصل از مدل میدلی و همکاران به عنوان بهترین مدل

محاسبه ضریب تبیین  $R^2$  بیشینه یکی از ساده ترین ملاک ها برای تعیین بهترین مدل است که علاوه بر آن، پارامترهای آماری نظیر کمترین مقدار مربع کای ( $X^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطاء (RMSE) برای تعیین بهترین مدل انتخاب شدند که روابط آن ها به صورت معادلات (۷) و (۸) ارائه شده است (دویماز و پالا، ۲۰۰۲):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N \cdot p} \quad (7)$$

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (8)$$

در روابط (۷) و (۸)،  $MR_{exp,i}$  مبین آمین نسبت رطوبتی مشاهده شده،  $MR_{pre,i}$  مبین آمین نسبت رطوبتی پیش بینی شده،  $N$ ، تعداد مشاهدات و  $p$ ، تعداد ثابت ها در مدل می باشد.

### نتایج و بحث:

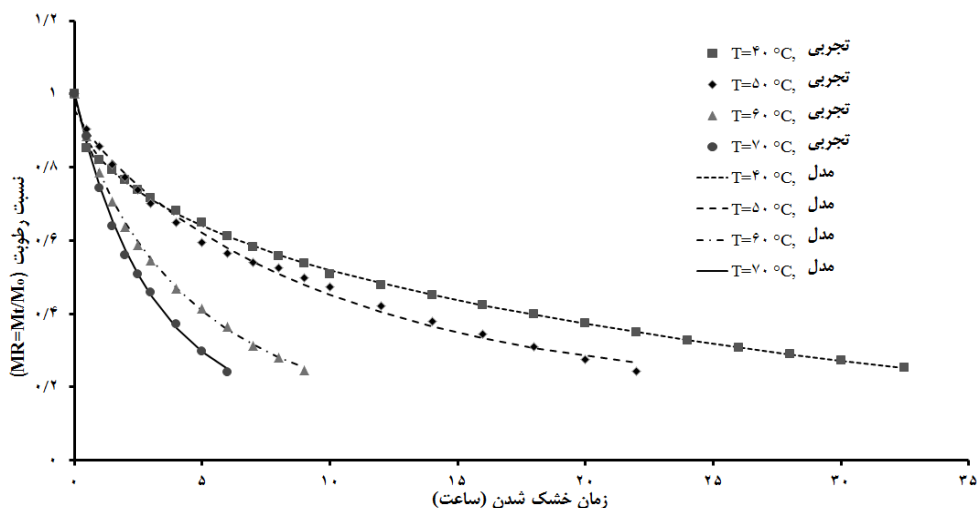
رطوبت اولیه محصول از میانگین سه تکرار  $73/73$  درصد بر پایه تر (۲/۸۱ بر پایه خشک) به دست آمد که با نتایج ارئه شده حدود ۷۱٪ تا ۷۵٪ توسط ضرابی (۱۳۷۷)، مقدار  $2/6$  تا  $3/3$  کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک توسط یالدیز و همکاران (۲۰۰۱) و مقدار ۷۵٪ گزارش

افزایش دما موجب افزایش شیب منحنی‌های به‌دست آمده می‌شود که نشان دهنده‌ی نرخ بالای خشک شدن می‌باشد. در ساعات اولیه خشک شدن کاهش رطوبت سریع‌تر است (یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱). ولی در ساعات بعدی به سبب اینکه رطوبت باید از قسمت‌های داخلی انگور به سطح بیرونی برسد و سپس تبخیر گردد، کاهش رطوبت کند می‌شود. زمان رسیدن به محتوی رطوبت نهایی ۱۸٪ از محتوی رطوبت اولیه برای دماهای مختلف هوای خشک کننده بین ۶ تا ۳۲/۵ ساعت به‌دست آمد.

برای انگور سفید بی‌دانه رقم ارومیه در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل بسیار به هم نزدیک بوده بطوری که منحنی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل روی یکدیگر منطبق شدند. افزایش دما سرعت خروج رطوبت از حبه‌های انگور را افزایش داده و موجب روند کاهشی قابل ملاحظه‌ای در منحنی‌های به‌دست آمده از تغییرات نسبت رطوبت به زمان می‌شود و یک رابطه معکوس بین دمای خشک شدن و زمان خشک کردن وجود دارد (اکپینار و همکاران، ۲۰۰۳). همچنین

جدول ۲- مقایسه دقت برازش مدل‌ها بر اساس متوسط شاخص‌های آماری در دماهای مختلف

شماره مدل	R <sup>۲</sup>	X <sup>۲</sup>	RMSE
۱	۰/۹۸۳۱۲۹	۳/۵۸۶×۱۰ <sup>-۳</sup>	۰/۰۵۲۹۹۵
۲	۰/۹۹۷۴۵۷	۱/۲۵۰×۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۰۳۳۰۶۰
۳	۰/۹۸۳۱۲۹	۳/۷۹۳×۱۰ <sup>-۳</sup>	۰/۰۵۳۰۳۴
۴	۰/۹۷۶۷۸۱	۱/۲۳۲×۱۰ <sup>-۳</sup>	۰/۰۳۲۰۹۲
۵	۰/۹۹۱۵۵۴	۴/۴۶۵×۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۰۱۸۰۳۸
۶	۰/۹۷۶۷۸۱	۱/۳۵۹×۱۰ <sup>-۳</sup>	۰/۰۳۲۰۹۲
۷	۰/۹۸۵۷۱۶	۳/۳۶۳×۱۰ <sup>-۳</sup>	۰/۰۴۳۱۳۵
۸	۰/۹۷۴۴۱۱	۲/۹۸۷×۱۰ <sup>-۳</sup>	۰/۰۳۲
۹	۰/۹۸۴۶۶۸	۳/۵۷۰×۱۰ <sup>-۳</sup>	۰/۰۴۹۵۱
۱۰	۰/۹۹۷۸۵۹	۱/۶۷۹×۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۰۱۰۲۳۴



شکل ۲- منحنی پیشروی خشک شدن لایه نازک انگور سفید بی‌دانه در سرعت هوای ثابت ۱/۲ متر بر ثانیه و دماهای مختلف برای داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل میدلی و همکاران

نزولی، اگر هوای خشک کننده با حرارت ثابت اعمال شود، دمای سطح محصول تا رسیدن به دمای حباب خشک هوای خشک کننده افزایش می یابد (فلوز، ۲۰۰۰)؛ به همین دلیل بیشتر آسیب های حرارتی محصول در مرحله با نرخ نزولی اتفاق می افتد؛ لذا برای کنترل حدود آسیب های حرارتی باید دمای هوا و در نتیجه نرخ خشک شدن کنترل شود؛ در همین ارتباط دویماز و پالا (۲۰۰۲) گزارش کردند که در دمای ۸۰ درجه سلسیوس نرخ خشک شدن نسبت به دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس خیلی بزرگتر است و آنها علت این امر را تخریب پوست حبه های انگور در این دما اعلام کردند.

ثابت نرخ خشک شدن  $k(R^2)$  و ضرایب (بی بعد)  $a, b, c, n$  برای مدل های ارائه شده در جدول ۱ برای هر دماهای مختلف با استفاده از آنالیز رگرسیون غیر خطی محاسبه گردید. نتایج آنالیز رگرسیون غیر خطی و آنالیزهای آماری انجام شدن روی مدل میدلی و همکاران برای دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به جدول فوق با افزایش دما ثابت نرخ خشک شدن ( $k$ ) افزایش می یابد که این فرایند در شکل ۳ ب نشان داده شده است. افزایش ثابت خشک شدن با افزایش دما توسط محققان مختلف نیز گزارش شده است (آکپینار و همکاران، ۲۰۰۳؛ پنگاوان و همکاران، ۱۹۹۹).

نتایج برآزش داده ها نشان داد که مدل میدلی و همکاران می تواند رفتار خشک شدن انگور سفید بی دانه را بهتر توصیف کند اما تاثیر دمای هوای خشک کننده را نشان نمی دهد بنابراین مقادیر ثوابت مدل میدلی در مقابل دمای هوای خشک کننده با استفاده از آنالیز رگرسیون غیر خطی بررسی شد و در نهایت ترکیب های با بالاترین ضریب تبیین در مدل نهایی استفاده شد. با توجه به نتایج آنالیز رگرسیون، مدل پذیرفته شده، ثوابت و ضرایب که تاثیر دمای هوای خشک کننده را در مدل دخیل می کنند به صورت رابطه (۹) می باشد:

نرخ شدن انگور از رابطه ۶ محاسبه شد. منحنی تغییرات نرخ خشک شدن به محتوی رطوبتی در (شکل ۳. الف) نشان داده شده است. فرآیند خشک کردن انگور در نرخ نزولی انجام شد و خشک کردن با نرخ ثابت در هیچ یک منحنی های خشک شدن انگور مشاهده نشد. مشاهدات محققان قبلی نیز این پدیده را برای انگور تأیید می کند (پنگاوان و همکاران، ۱۹۹۹؛ یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱). همانطور که مشاهده می شود، با افزایش دما نرخ خشک شدن نیز افزایش می یابد. این افزایش به سبب افزایش پتانسیل انتقال حرارت بین هوا و انگور است که گرمای نهان تبخیر لازم برای تبخیر آب از انگور را تأمین می کند. تأثیر دما بر نرخ خشک شدن توسط محققان مختلف نیز گزارش شده است (آکپینار و همکاران، ۲۰۰۳؛ پنگاوان و همکاران، ۱۹۹۹). نرخ خشک شدن همچنین به مقدار محتوی رطوبتی محصول بستگی دارد، هر چه محتوی رطوبتی زیادتر باشد، فرآیند خشک شدن با نرخ بزرگتری انجام می شود (آکپینار و همکاران، ۲۰۰۳؛ یالدیز و همکاران ۲۰۰۱). هنگامی که محتوی رطوبتی محصول کمتر از محتوی رطوبت بحرانی باشد، نرخ انتقال رطوبت از داخل محصول کمتر از نرخ انتقال بخار آب به هوای اطراف خواهد شد و در نتیجه از فشار جزئی بخار بالای سطح ماده نیز کاسته شده و نرخ خشک شدن نسبت به زمان به آهستگی کاهش می یابد (فلوز، ۲۰۰۰). چون نرخ انتقال جرم داخلی (مقاومت داخلی برای انتقال رطوبت) به سطح محصول که بستگی به تغییرات غلظت رطوبت دارد و عامل کنترل کننده فرآیند خشک شدن است، کاهش می یابد. از طرفی در خشک کردن انگور پوشش مومی موجود روی پوست میوه نیز در کنترل فرآیند خشک شدن دخیل است (دویماز و ایسماعیل، ۲۰۱۱؛ دویماز و پالا، ۲۰۰۲).

هنگامی که هوا گرم می شود، بخار آب بیشتری را می تواند با خود حمل کند؛ به عبارت دیگر رطوبت نسبی آن کاهش می یابد؛ بنابراین محصولات با هوای گرمتر بهتر خشک می شوند. خشک شدن در مرحله با نرخ



$$MR = a.exp(-kt^n) + bt$$

$$a = -2E - 0.05T^3 + 0.0032T^2 - 0.1753T + 4/1353 \quad R^2=1$$

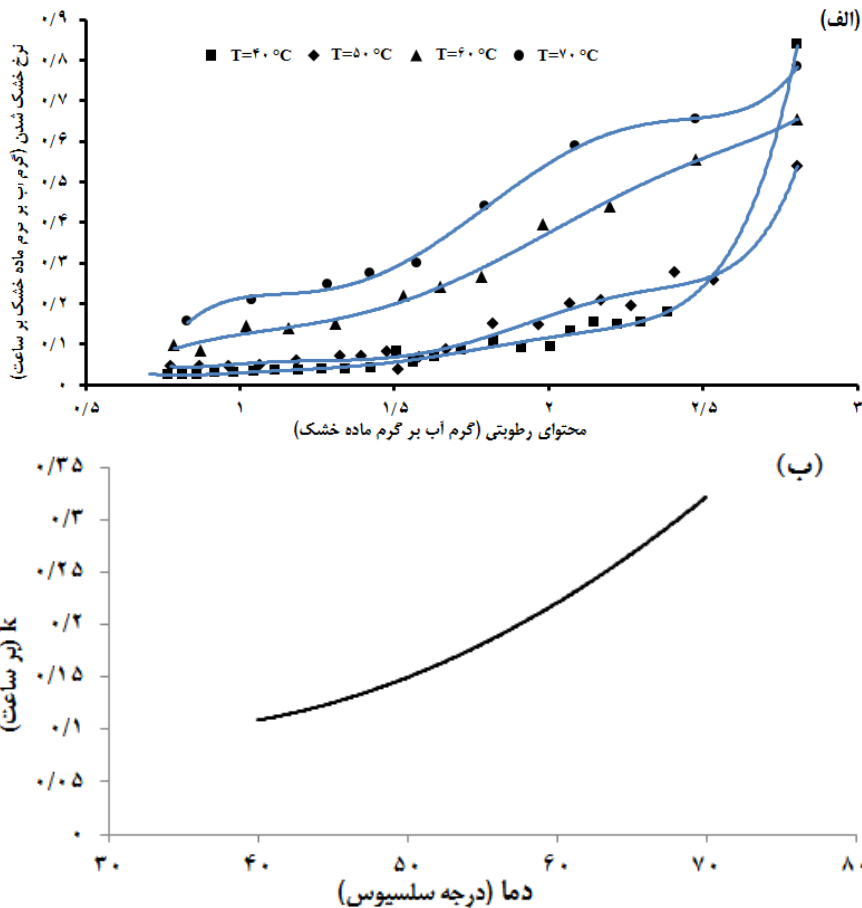
$$k = 0.000T^2 - 0.0095T + 0.2469 \quad R^2=0.9268$$

$$n = -0.0006T^2 + 0.0748T - 1/5612 \quad R^2=0.9121$$

$$b = 0.0222 \ln(T) - 0.824 \quad R^2=0.9764$$

بالایی در تمام دماها مشاهده می شود. از بین دماهای مورد آزمایش برآزش مدل برای دمای ۵۰ درجه سلسیوس (ضریب X به یک نزدیکتر است) بهترین و نزدیکترین برآزش را داشت زیرا موقعی داده های آزمایش با داده های مدل بر هم منطبق شوند شیب خط باید ۱ شود.

ضرائب a، b، k و n ضرایب تجربی مدل های خشک کردن می باشند. با این مدل می توان رطوبت نسبی (MR) انگور سفید بی دانه در هر لحظه در طول فرآیند خشک کردن را با دقت بالا تخمین زد. برای ارزیابی بهتر مدل ارائه شده، رطوبت نسبی محاسبه شده به وسیله مدل نسبت به داده های حاصل از آزمایش در نمودار شکل (۴) رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود رابطه خطی با  $R^2$

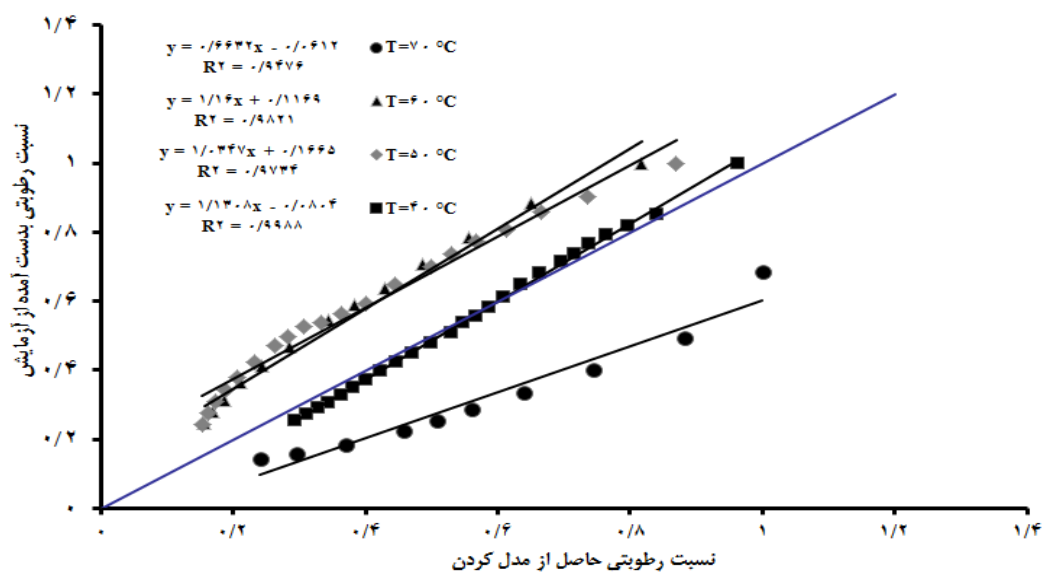


شکل ۳- الف. منحنی نرخ خشک انگور در سرعت هوای ثابت ۱/۲ متر بر ثانیه ب. منحنی تغییرات ضریب نرخ خشک شدن بر حسب دما

عباسپور کلان و همکاران: مدل سازی خشک شدن لایه نازک انگور سفید بی دانه

جدول ۳. مقادیر ثوابت و ضریب مدل میدلی و همکاران به تفکیک دمای هوای خشک کننده

$R^2$	n	B	a	$k(h^{-1})$	زمان خشک شدن	دما (درجه سلسیوس)
۰/۹۹۹۰۱۹	۰/۵۱۱۶۴۲	-۰/۰۰۲۴۶	۰/۹۹۴۴۴۷	۰/۱۸۵۳	۳۲/۵	۴۰
۰/۹۹۵۳۱۵	۰/۸۴۵۸۲۴	۰/۰۰۳۵۷	۰/۹۵۷۶۵۲	۰/۱۱۸۹	۲۲	۵۰
۰/۹۹۹۲۰۲	۰/۸۴۱۰۷۵	۰/۰۰۵۷۱	۰/۹۹۸۶۰۲	۰/۲۵۰۷	۹	۶۰
۰/۹۹۷۹	۰/۹۴۵۴۱۳	۰/۰۱۰۶۲	۱/۰۰۶۴۸۸	۰/۳۱۱۲	۶	۷۰



شکل ۴- مقایسه نسبت های رطوبتی بدست آمده از آزمایش و پیش بینی شده توسط مدل

نتایج آنالیز آماری و آنالیز رگرسیون چند متغیره از بین ده مدل خشک شدن لایه نازک مدل میدلی و همکاران توانست رفتار خشک شدن لایه نازک انگور سفید بی دانه را بطور رضایت بخشی توصیف کند. همچنین افزایش دما موجب کاهش زمان خشک شدن انگور شده و ثابت نرخ خشک شدن را در مدل میدلی و همکاران افزایش می دهد.

### نتیجه گیری

در این مطالعه خشک شدن لایه نازک انگور سفید بیدانه رقم ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. مرحله با نرخ ثابت خشک شدن در هیچ یک از آزمایش ها در فرآیند انگور سفید بی دانه مشاهده نشد. فرآیند خشک شدن انگور در مرحله با نرخ نزولی و از محتوی رطوبتی اولیه تا رطوبت ۱۸٪ برپایه تر ادامه یافت. زمان رسیدن به رطوبت نهایی ۱۸٪ از محتوی رطوبت در رنج دمایی ۴۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس بین ۶ تا ۳۲/۵ ساعت به دست آمد. مطابق

### منابع

- ۱- بی نام، ۱۳۸۹ نتایج طرح آمارگیری نمونه‌ایی محصولات باغی «سال ۱۳۸۷». وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، دفتر آمار و فناوری اطلاعات.
- ۲- ضرابی، م ۱۳۷۷ تعیین و بررسی پارامترهای طراحی در خشک کردن انگور. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۵۵ص.
- 3- Akpınar, E., Midilli, A., Bicer, Y. 2003. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Convection and Management*, 44, 1689-1705.
- 4- Alvarez, P. and Leques, P. 1986. A semi-theoretical model for the drying of Thompson seedless grapes. *Drying Technology*, 4(1): 1-17.
- 5- Anonymous, 1990. AOAC: Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- 6- Babalis, S.J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., and Belessiotis, V.G. 2006. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, 75: 205- 214.
- 7- Cakmak, G., and Yildiz, C. 2011. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and Bioproducts Processing*, 89: 103-108.
- 8- Doymaz, I. 2005. Drying behavior of green beans. *Journal of Food Engineering*, 69: 161-165.
- 9- Doymaz, I., and Ismail, O. 2011. Drying characteristics of sweet cherry. *Food and Bioproducts Processing*, 89: 31–38.
- 10- Doymaz, I., and Pala, M. 2002. The effect of dipping pretreatment on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 52: 413-417.
- 11- Ekechukwu, O. V. (1999). Review of solar-energy drying system I: an overview of drying principles and theory. *Energy Conversion and Management*, 40: 593-613.
- 12- Fellows, P. 2000. *Food processing technology: principles and practice*. Second edition. Published by CRC press.
- 13-..Anonymous, 2011. FAO Statistics Division (<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>).
- 14- Henderson, S.M. and Pabis, S. 1961. Grain drying theory .I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6: 169-174.
- 15- Jairaj, K.S., Singh, S.P., and Srikant, K. 2009. A review of solar dryers developed for grape drying. *Solar Energy*, 83: 1698-1712.
- 16- Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., Kazemi, M., Nikbakht, A. M. 2010. Drying of Pomegranate Arils: comparison of prediction from mathematical models and neural networks. *International Journal of Food Engineering*, 6(3): 15.

- 17- Mujumdar, A. S. (1987). Handbook of industrial drying. New York: Marcel Dekker.
- 18- Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L., and Sarvahandia, P.N. 1999. Effect of various dipping pretreatment on drying kinetics of Thompson Seedless Grapes. Journal of Food Engineering, 39: 211-216.
- 19- Sharma, A. K. and Adulse, P. G., 2007. Raisin Production in India. NRC for Grapes, Pune.
- 20- Sitkie, G. 1986. Mechanics of agricultural materials. Technology and Engineering, 487 pages.
- 21- Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H. I. 2001. Mathematical modeling of thin layer drying of sultana grapes. Energy, 26: 457-465.
- 22- Zomorodian, A., and Moradi, M. 2010. Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for cuminum cyminum. Journal of Agricultural Sciences and Technology. 12: 401-408.